

---

# ATLAS实验高颗粒度时间探测器

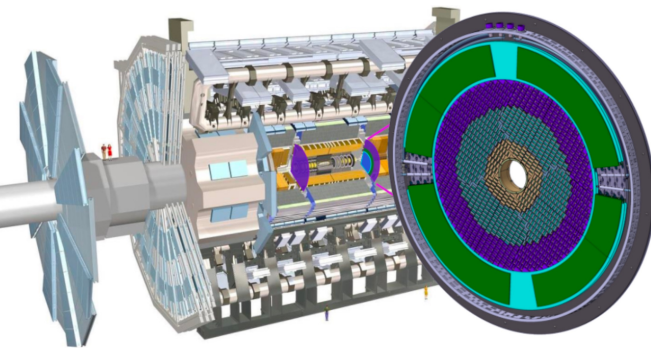
梁志均

中国科学院高能物理研究所

# High Granularity Timing Detector (HGTD)

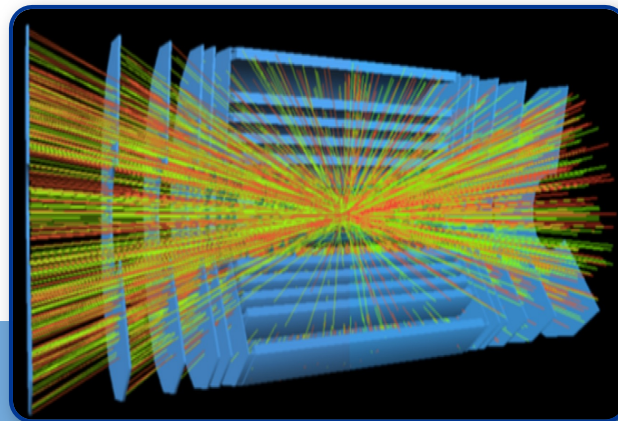
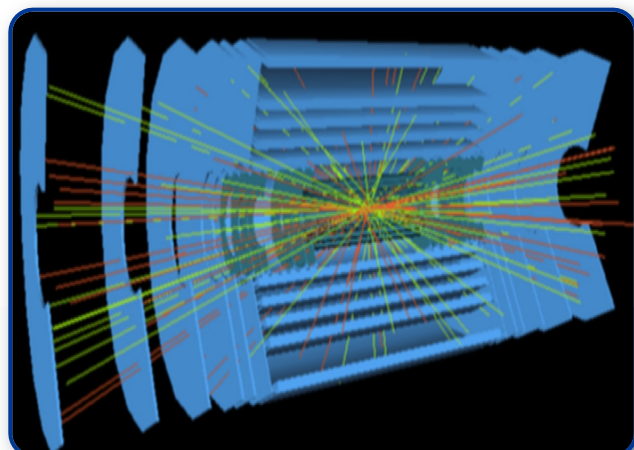
## ATLAS实验高颗粒度时间探测器

- 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级（数纳秒→30皮秒）
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题
  - 6.4平方米的硅探测器, 30皮秒的时间分辨
  - 毫米级的颗粒度, 超过三百万个读出通道
  - 能承受  $2.5 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$  的等效中子通量的辐照



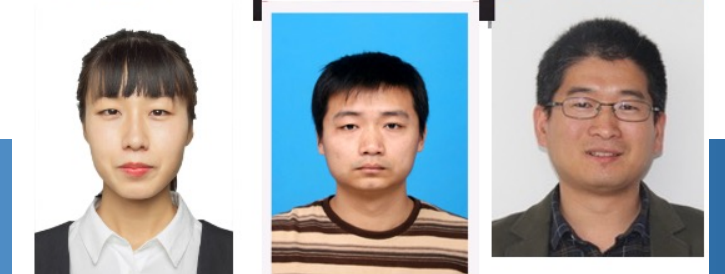
目前的ATLAS探测器

高亮度LHC升级后的ATLAS探测器



# ATLAS高时间分辨探测器：重要管理职位

- 中国组在ATLAS高颗粒的时间探测器项目（HGTD）中起主导作用
  - 本人目前担任项目副经理（2025年3月--2027年2月）
  - 2021-2025年2月,高能所Joao曾担任两届的HGTD项目经理
  - 5人曾担任Level-2召集人（梁志均，张杰，赵梅，张照茹，吴雨生）
  - 3人担任Level-3召集人（张杰，樊磊，樊云云）
  - 1人曾担任speaker committee（刘衍文）



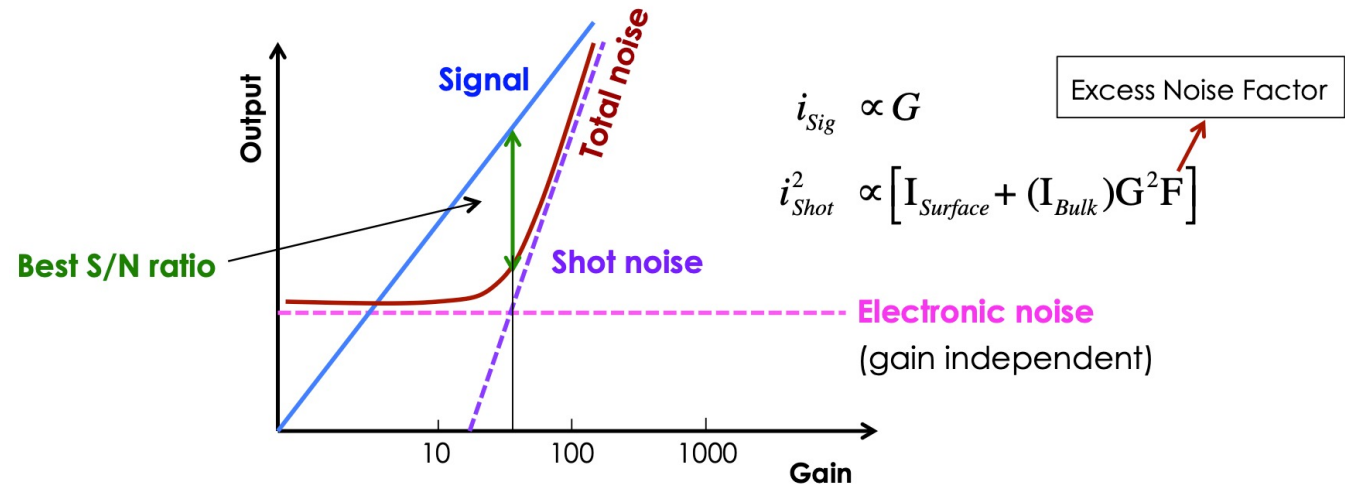
# Low Gain Avalanche Detectors (LGAD)

## 低增益雪崩硅传感器

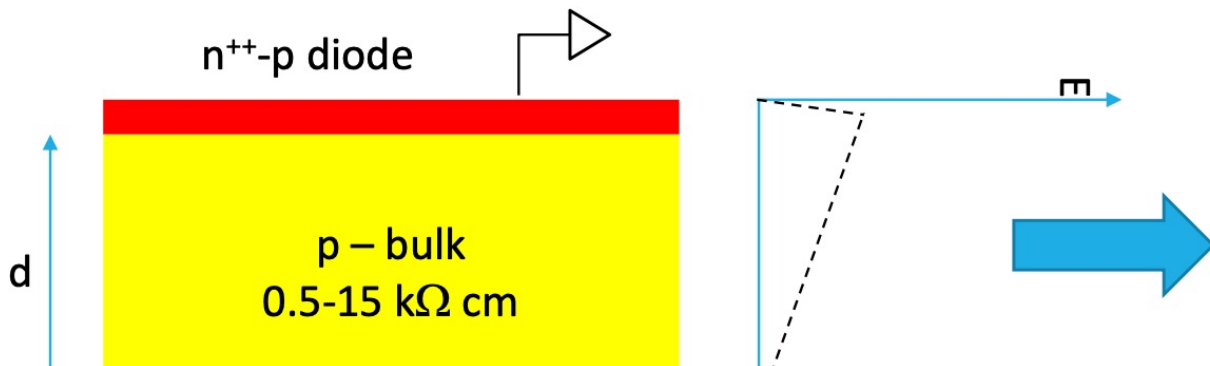
与APD 和 SiPM比较, LGAD has 适中的增益 (10-50)

- 信噪比高, 无自触发
- 减薄耗尽区 (漂移区)
- 提高电场与电子漂移速度

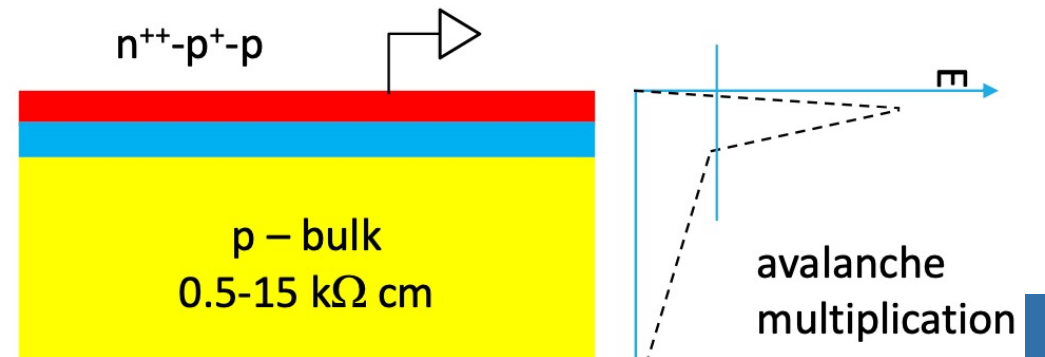
$$\sigma_{jitter}^2 = \left( \frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$



一般的 PIN 结传感器



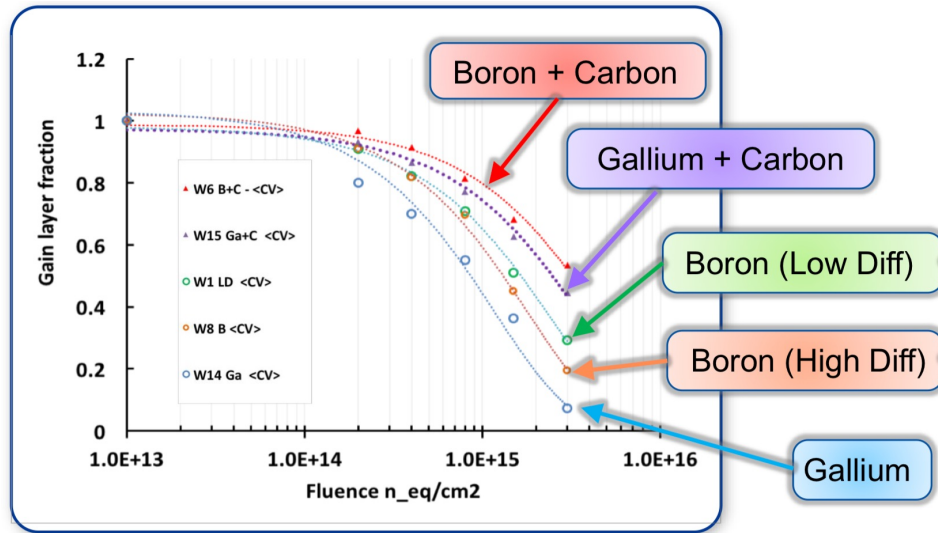
低增益雪崩硅传感器  
P+ gain layer on top of PIN diode



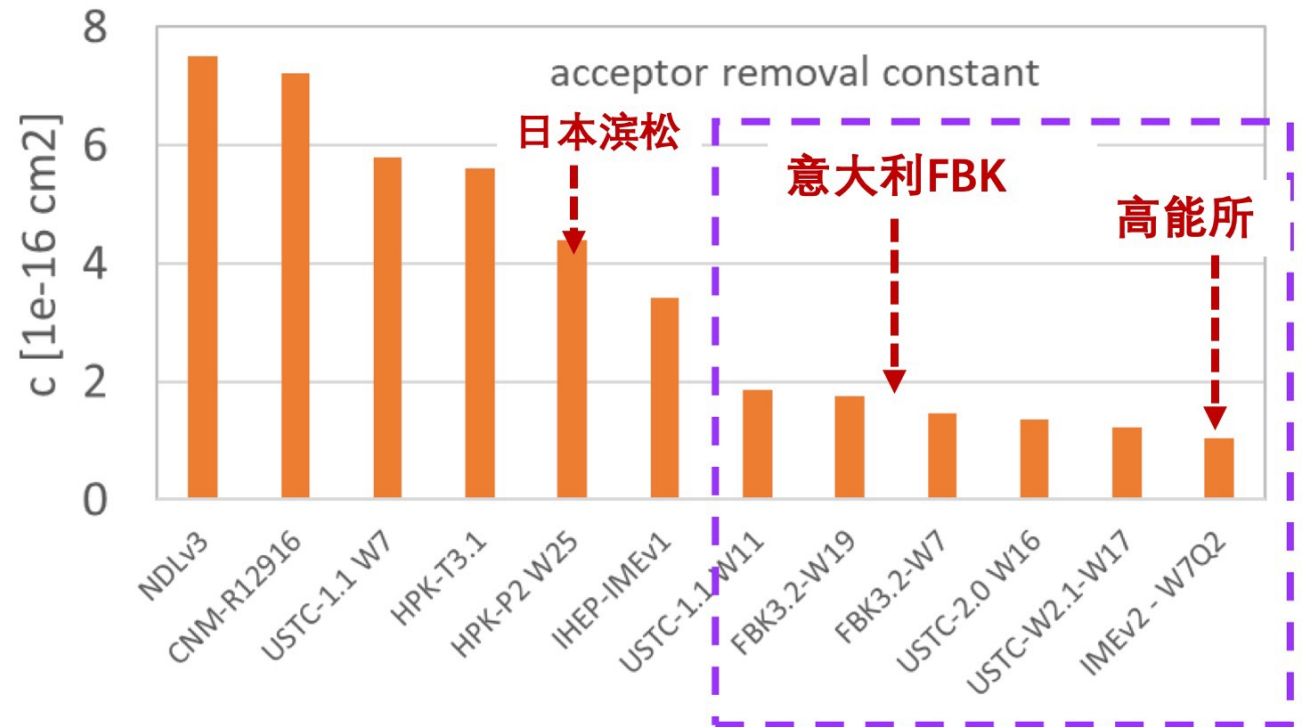
# LGAD传感器辐照后硼掺杂移除 (Acceptor removal)

- 辐照后，硼掺杂失去活性，LGAD传感器增益下降(Acceptor removal)
- 高能所等国产LGAD采用掺碳工艺
  - 显著减低辐照后损伤 (减低硼移除率)
  - 目前抗辐照性能优于滨松

高能所传感器  
目前移除率最低 (最佳抗辐照性能)



[G.Paternoster, FBK, Trento, Feb.2019]

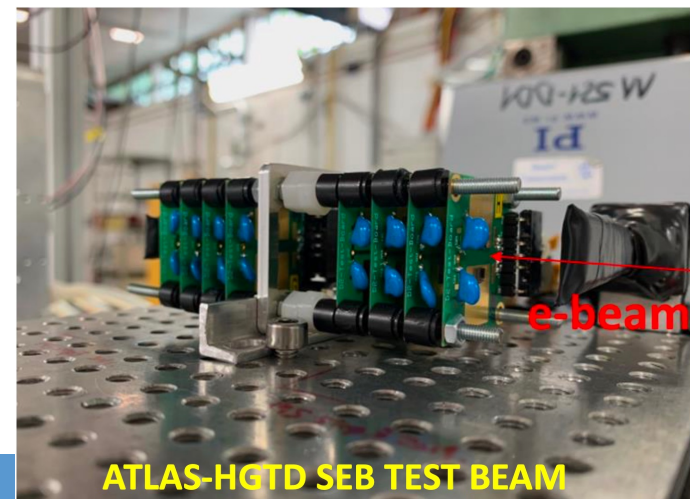
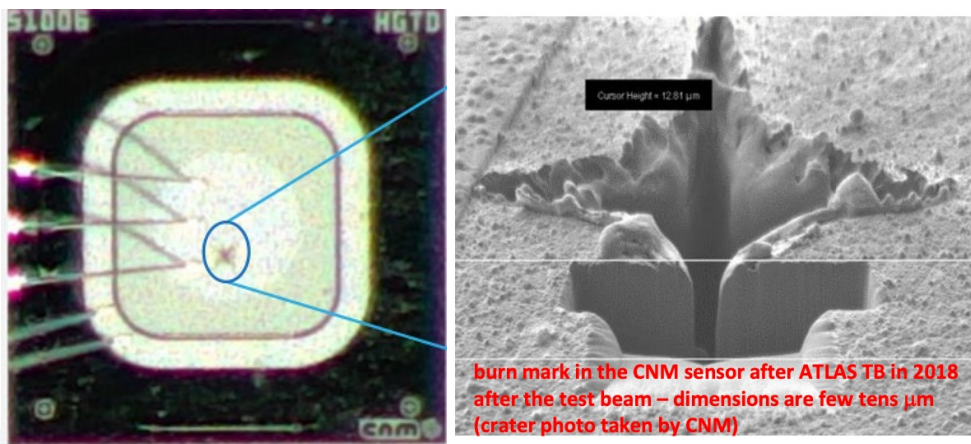


# 硅传感器的单粒子烧毁风险 Single Event Burnout (SEB)

- RD50, CMS and ATLAS 合作组在2021年确认LGAD的单粒子烧毁风险
- 高电压与高电场导致烧毁，工作电压要控制到  $<550\text{ V}$  (50微米的硅传感器)
- ATLAS合作组开展欧洲核子中心 (CERN) 的高能质子流测试
  - 辐照后，不掺碳的LGAD (滨松, 西班牙CNM) 烧毁率较高
  - 掺碳的LGAD基本能通过测试 (高能所, 中科大, 意大利FBK)
  - 高能所传感器辐照后，数十个样品全部通过测试，无一烧毁

单粒子烧毁后LGAD (滨松/CNM)

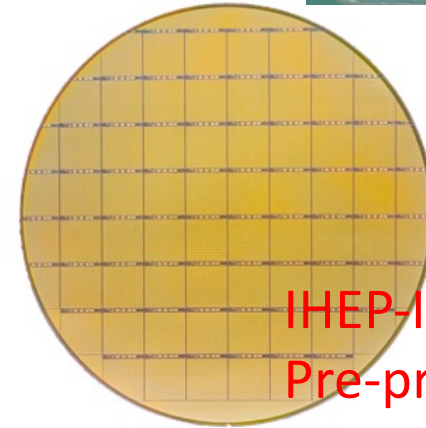
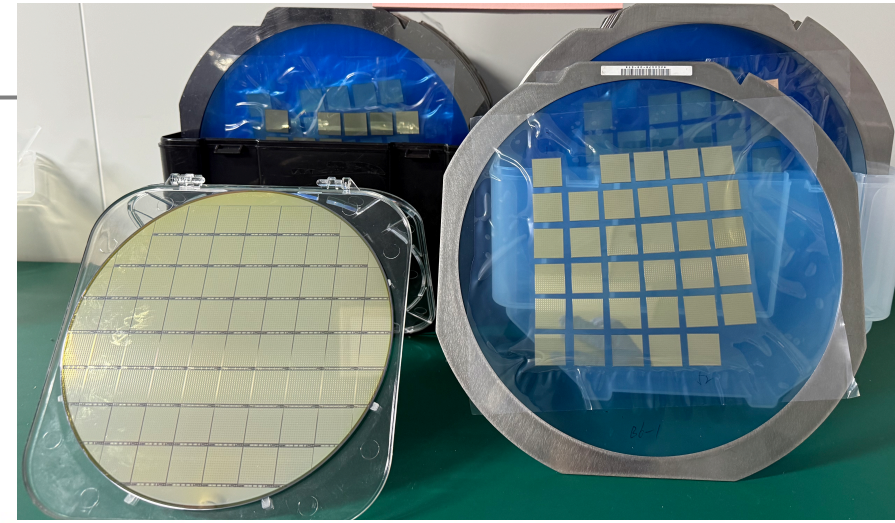
CERN test beam: 120 GeV 质子束流



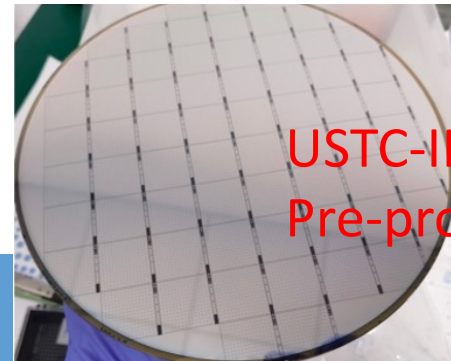
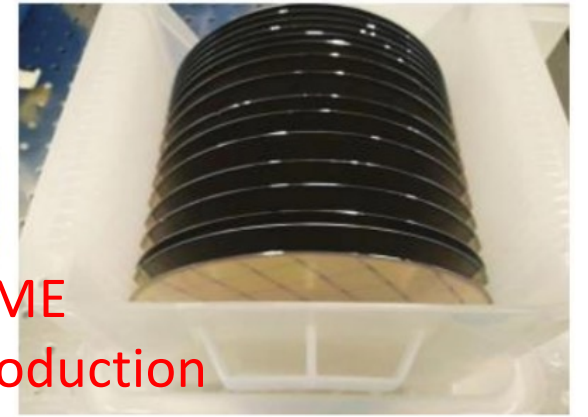
# LGAD传感器的研制进展

高能所-微电子所量产LGAD

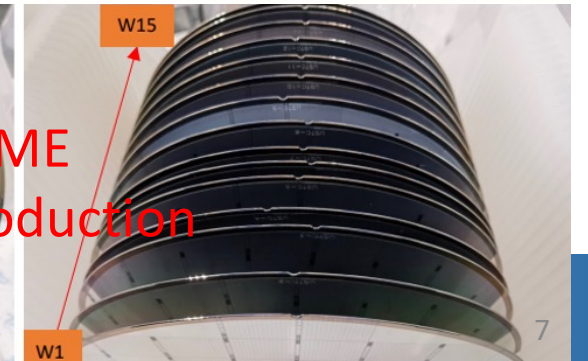
- CERN在国际招标中选择了**高能所-微电子所**的LGAD
  - 竞争者包括了意大利的FBK和日本滨松公司
  - **2025年2月正式签订合同**
- HGTD探测器的LGAD传感器100%在中国生成
  - **国产传感器首次在CERN的实验使用**
  - 高能所-微电子所: **90%** :  $\sim 8 \text{ m}^2$
  - 科大-微电子所: **10%**
- LGAD量产的最新进展：
  - **高能所-微电子所**
    - 2024年预量产完成1700个传感器
    - 2025年, 正式生产3000个传感器 (占项目15%)
  - **科大-微电子所**
    - 预量产完成270个传感器
    - 已经开始量产



IHEP-IME  
Pre-production



USTC-IME  
Pre-production

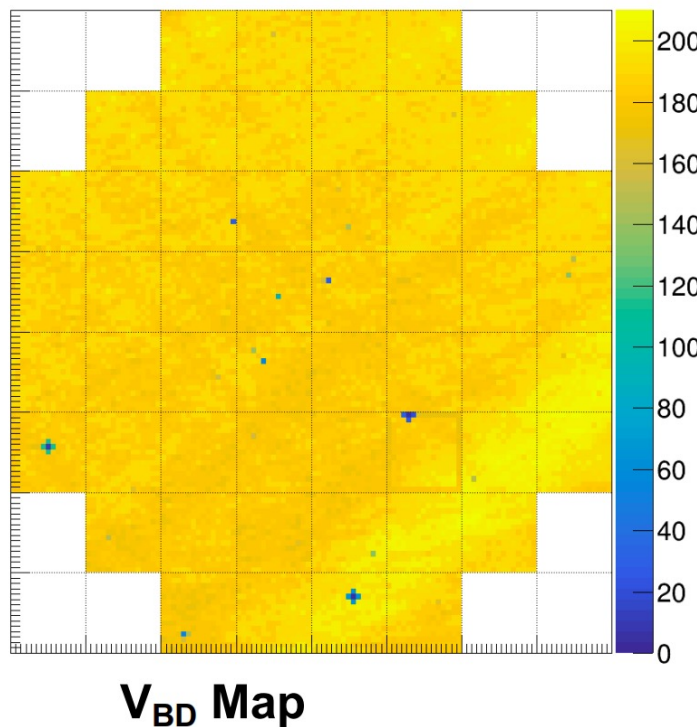
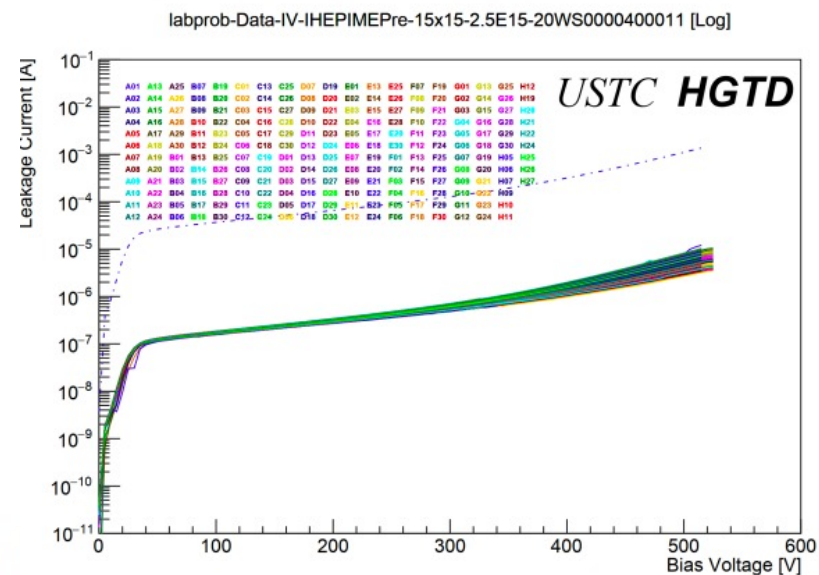


# LGAD传感器的预量产性能测试

- 高能所与中科大分别已经完成1702个与208个LGAD，接近总量~10%
- LGAD传感器有225个像素，辐照前后的漏电流与击穿电压都非常均匀
- 辐照前后，时间分辨率都可以达到30~40皮秒
- 高能所赵梅担任传感器组Level-2 召集人

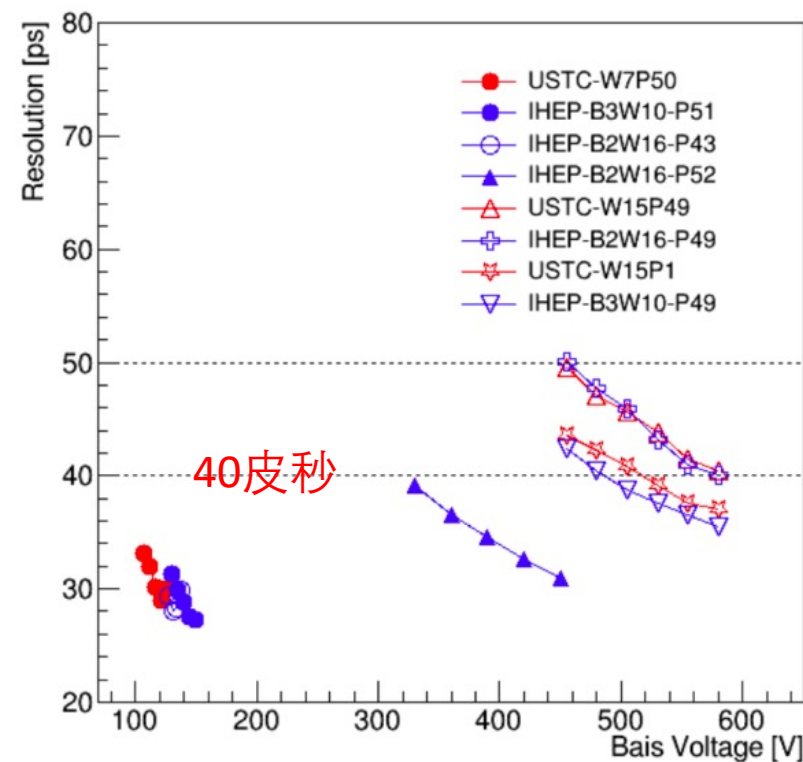
## 辐照后LGAD的漏电流与击穿电压

20WS0000400011@2.5E15 n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>



## 辐照后LGAD的时间分辨率

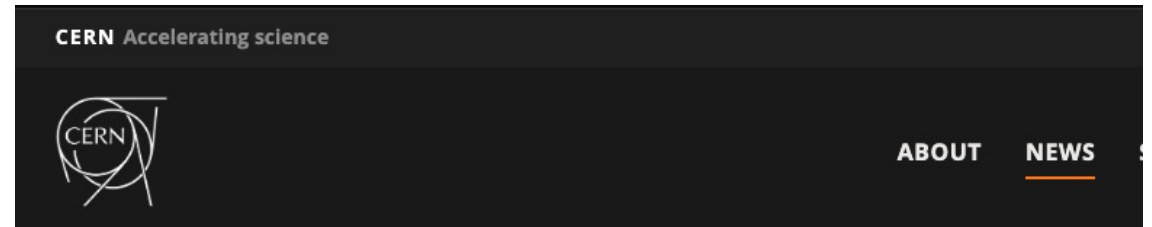
Time Resolution - HGTD TB June 2024





# ATLAS 杰出贡献奖 (Outstanding Achievement Award)

- 3名高能所成员与1名科大成员获得2025年ATLAS实验杰出贡献奖
  - 由于他们在LGAD传感器研发的贡献
  - The list of ATLAS award for HGTD project: Bojan Hiti (Ljubljana), Alissa Howard (Ljubljana), Xuwei Jia (Munich MPI), **Mengzhao Li (Beijing IHEP)**, Chihao Li (Michigan), **Kuo Ma (Hefei)**, Theodoros Manoussos (CERN), **Weiyi Sun (Beijing IHEP)**, Guilherme Tomio Saito (Sao Paulo), Iskra Velkovska (Ljubljana), Xiao Yang (CERN), **Mei Zhao (Beijing IHEP)**



News › News › Topic: Experiments

Voir en [français](#)

## Celebrating the outstanding achievements of the ATLAS collaboration

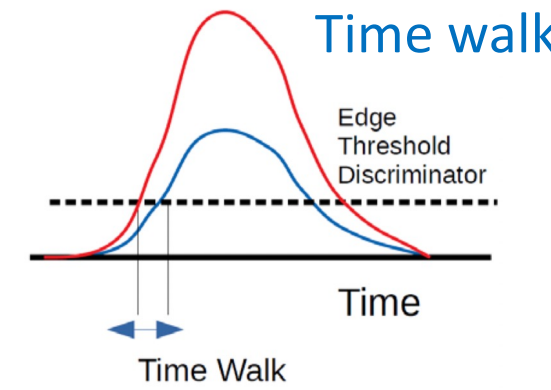
The ATLAS collaboration celebrated the dedication, ingenuity and collaborative spirit of its members at the 8th Outstanding Achievement Awards

8 JULY, 2025 | By ATLAS collaboration

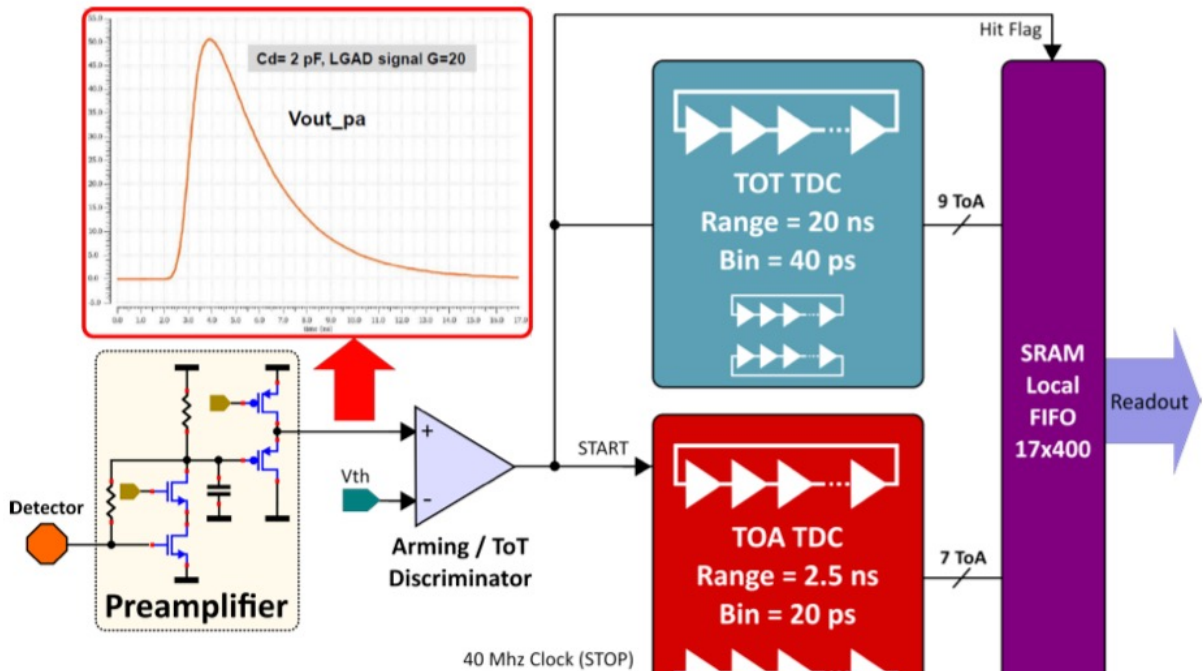
# ALTIROC : 超快读出ASIC



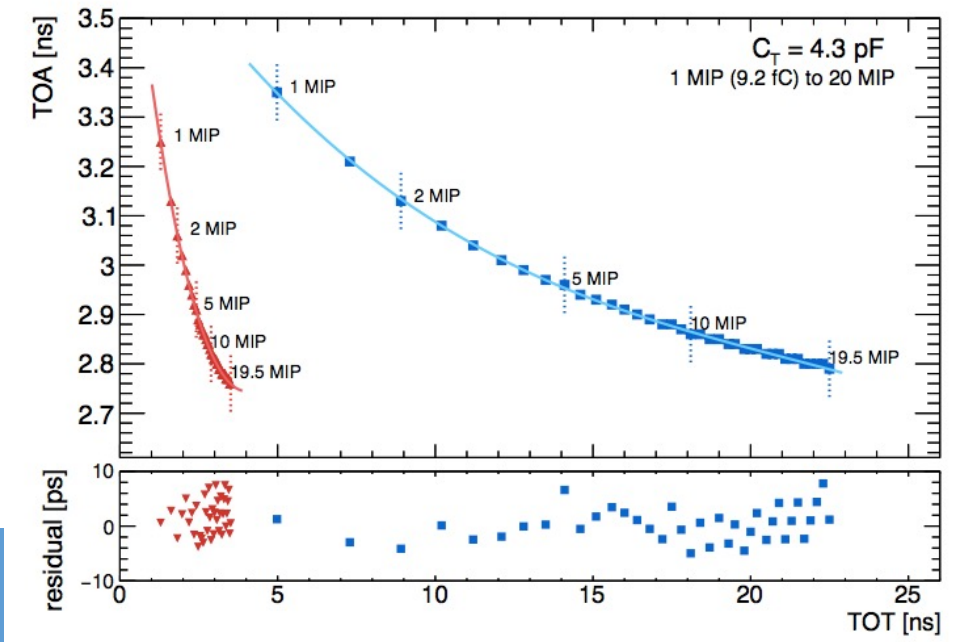
- ATLAS时间探测器研发超快读出ASIC芯片，多个单位参与
  - 高能所参与ASIC中数字电路部分的设计，承担50%的晶圆测试
- 225通道，每个通道有一个前端放大器，甄别器，两个TDC:
  - Time of Arrival (TOA) : Range of 2.5 ns and a bin of 20 ps (7 bits)
  - Time Over Threshold (TOT) : range of 20 ns and a bin of 40 ps (9 bits)



## ALTIROC 芯片原理图



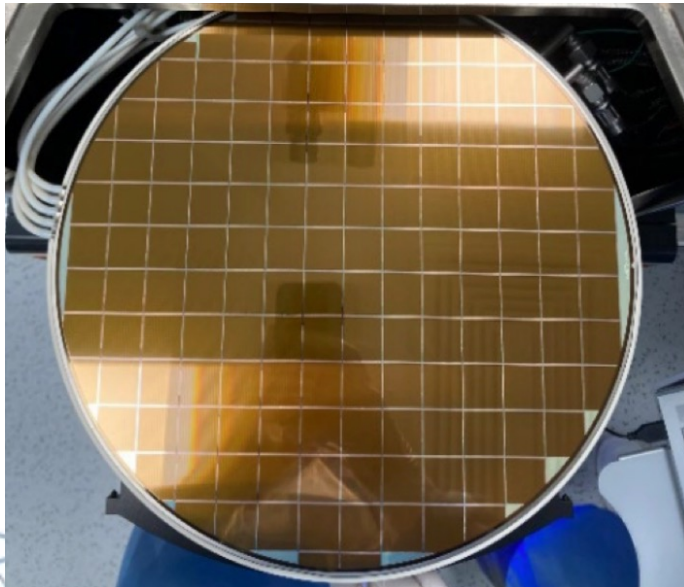
## Time walk correction with TOT



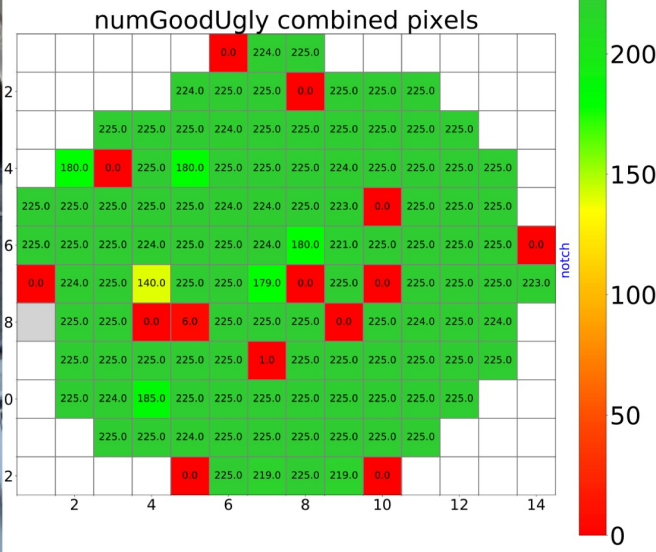
# ALTIROC 超快读出芯片的晶圆级测试

- 中国组与法国IJClab各承担50%的超快ASIC晶圆测试任务
- 高能所完成了晶圆级测试的平台，是皮秒级芯片测试任务，有很大挑战
- 高能所，上海、山大已经完成预量产ALTIROC晶圆的晶圆测试任务，并通过CERN的评审
  - 已经测试了超过14个晶圆（~2000个ASIC芯片）
  - 测试进度大幅度领先于法国单位。ATLAS决定把100%测试任务放到中国。

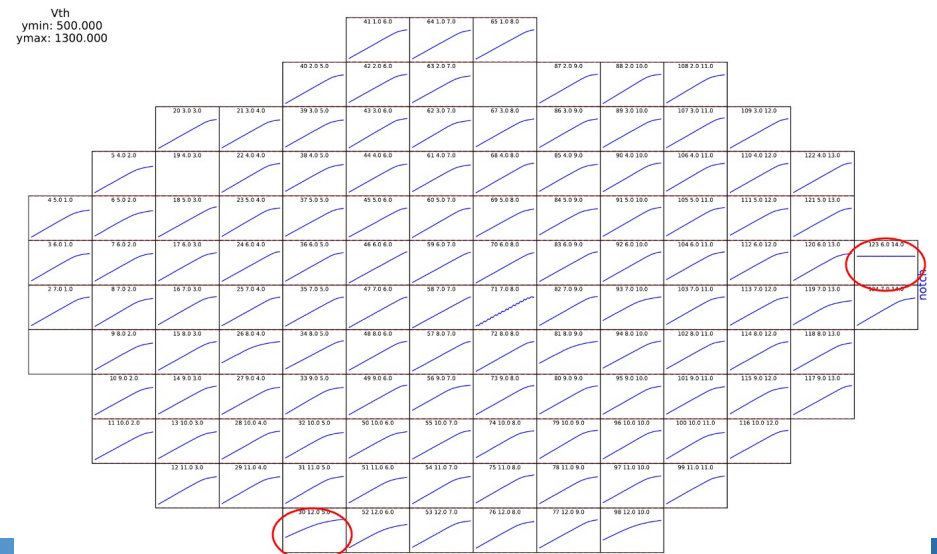
ALTIROC-A wafer



ASIC wafer test result

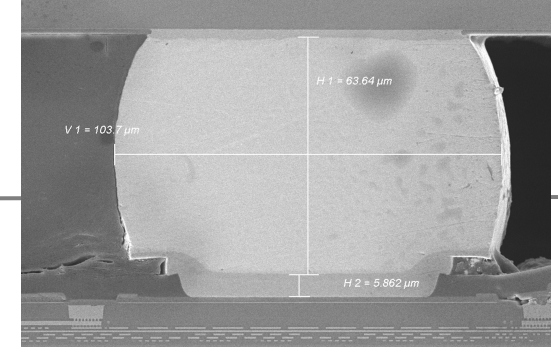


ASIC wafer test result

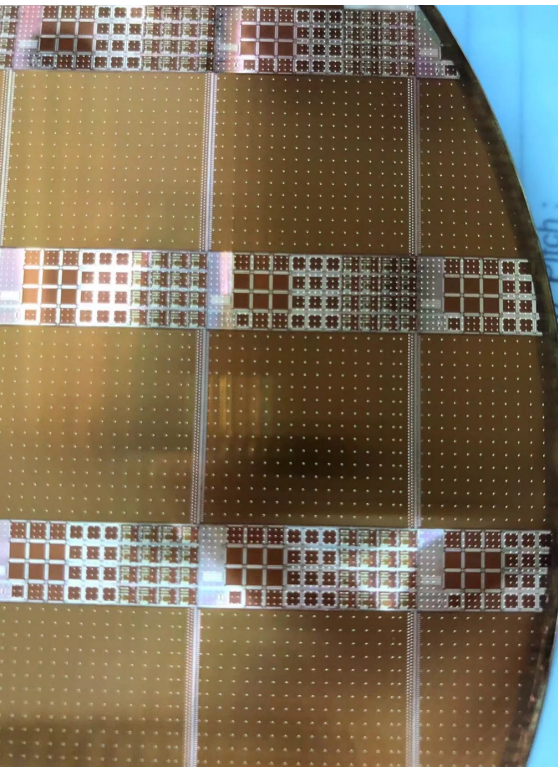


# 探测器模块：倒装焊封装

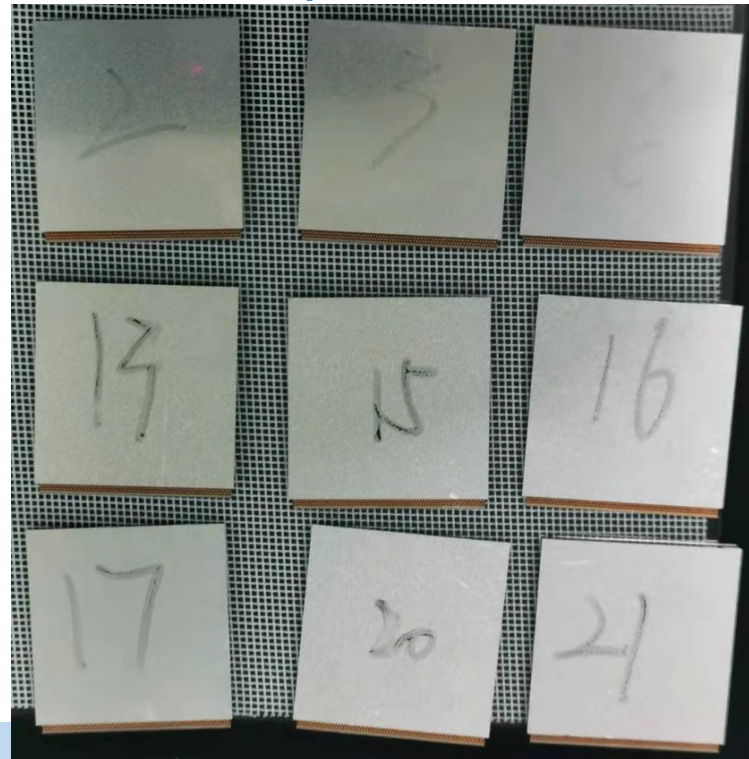
- 高能所承担项目中**50%**的倒装焊封装任务
- 高能所在国内已经研制出**100**多个倒装焊模块



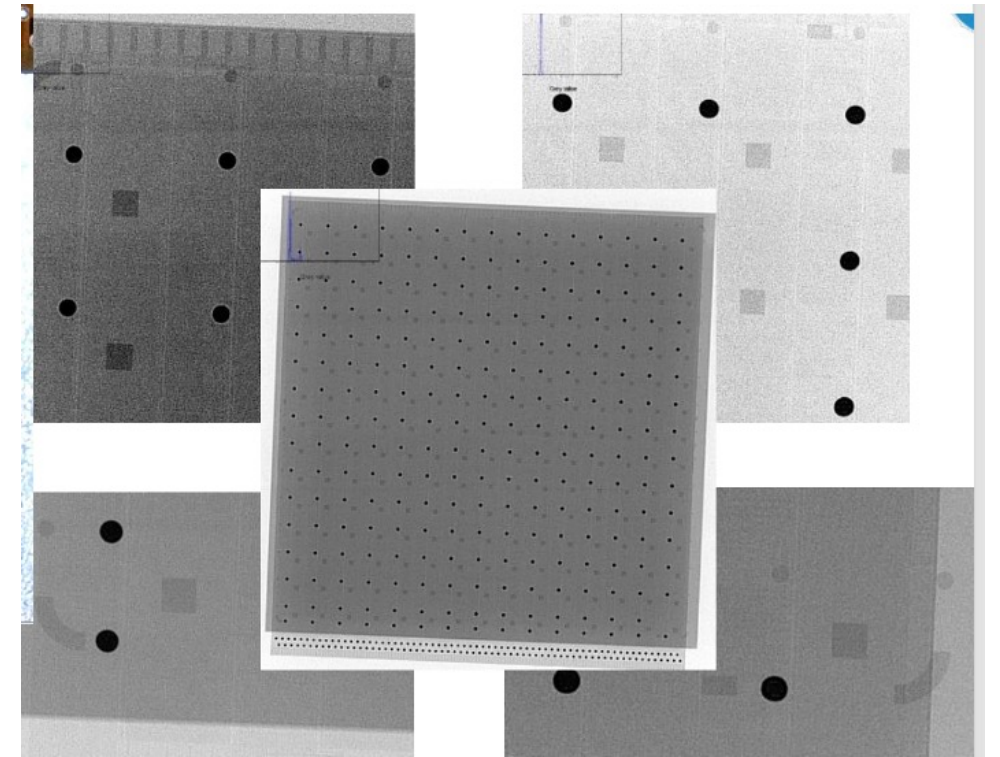
ALTIROC 芯片晶圆植球



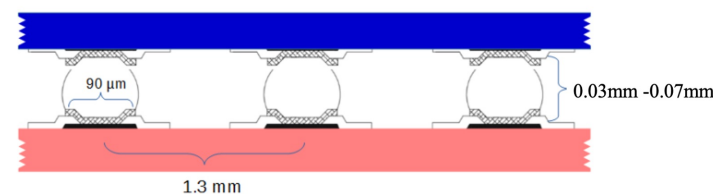
倒装焊模块后的模块



X-ray image of full-size hybrid



# 传感器与ASIC的倒装焊封装

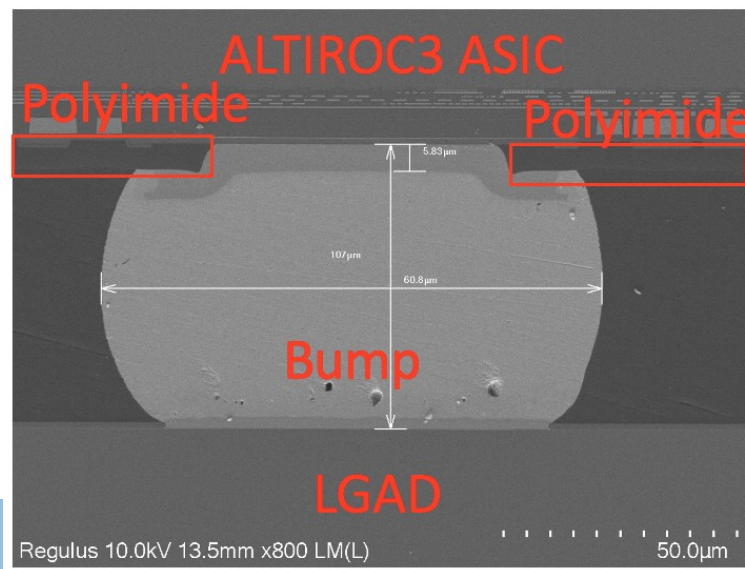


- 2023年末，HGTD项目遇到探测器模块的倒装焊热稳定性问题
  - -45度到40度热循环后，倒装焊脱落，ITK Pixel项目发现该问题，推迟LHC升级项目两年
  - HGTD探测器中，ASIC晶圆中台积电的polyimide保护层有问题（开窗尺寸与材质）
- 2024年，高能所攻关解决了HGTD探测器中的封装问题，通过CERN的评审
  - 用了更软的保护层材料吸收应力，使用更厚的LGAD传感器

旧倒装焊 热循环后，应力导致芯片的开裂



新倒装焊

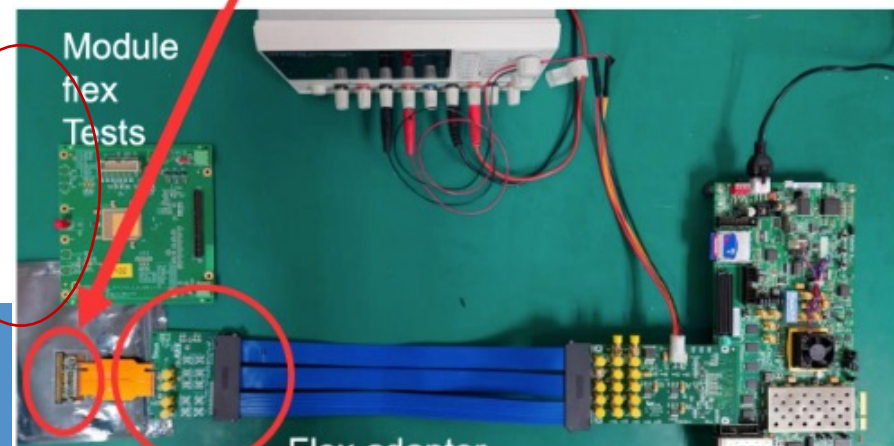
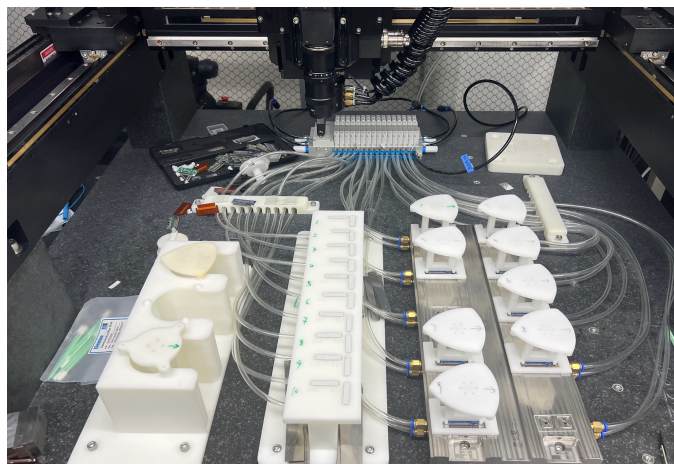
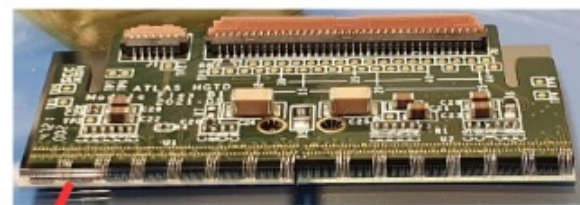
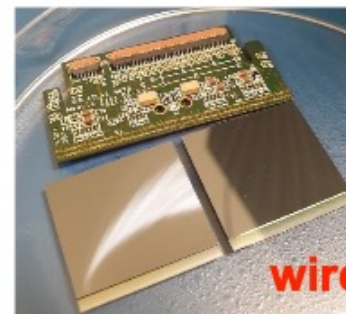
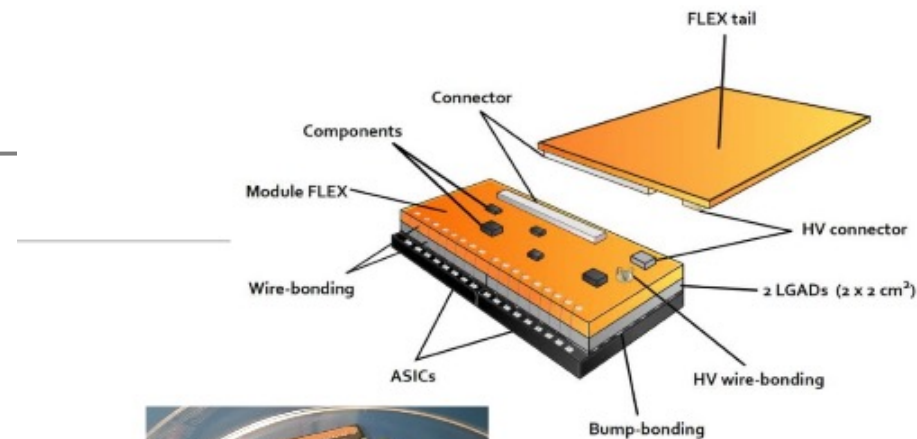


Consider low temperature (shrinking) situation  
Length of arrow means deformation magnitude



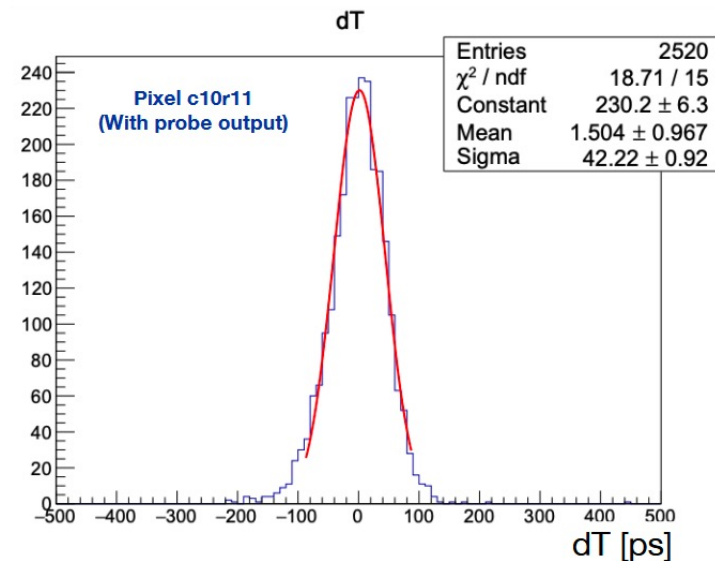
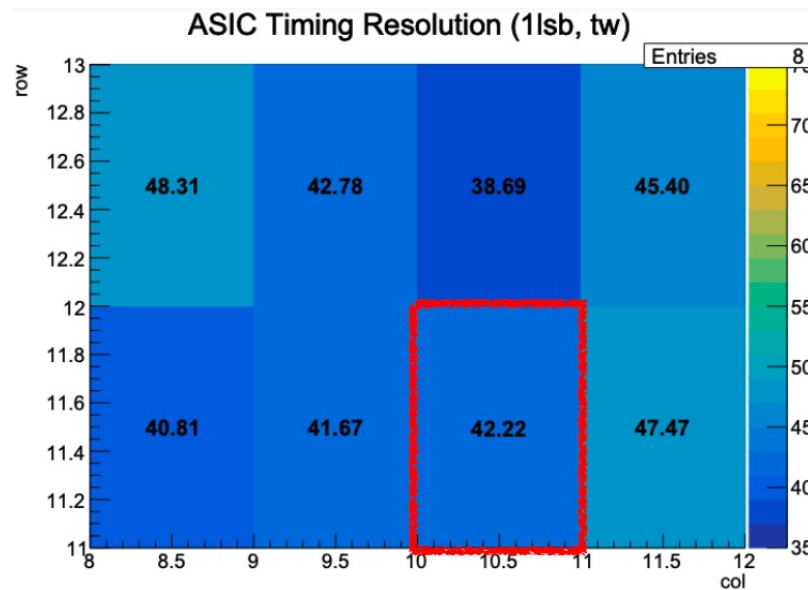
# ATLAS时间探测器模块组装

- HGTD项目总共需要8032个模块 (6.4平方米)
- 5个模块组装生产中心
  - 中国, 德国, 法国, 西班牙, 摩洛哥
  - 中国组是最大的生产中心, 组装**44%**的模块
    - 高能所、科大、山大、上交将合作完成
- 高能所、科大研制国产自动组装系统
  - 有高分辨图像系统, 做芯片图像识别
  - 自动芯片组装、点胶



# 探测器模块的束流测试

- HGTD的模块在CERN和DESY束流测试
  - 探测器模块是 $15 \times 15$ 像素阵列，225通道
  - 模块级别，每个像素的时间分辨 $\sim 42$ 皮秒

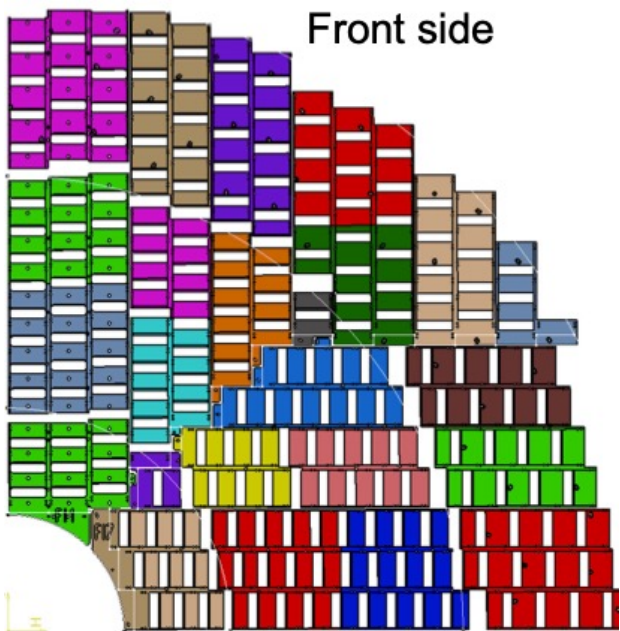


# HGTD探测器单元

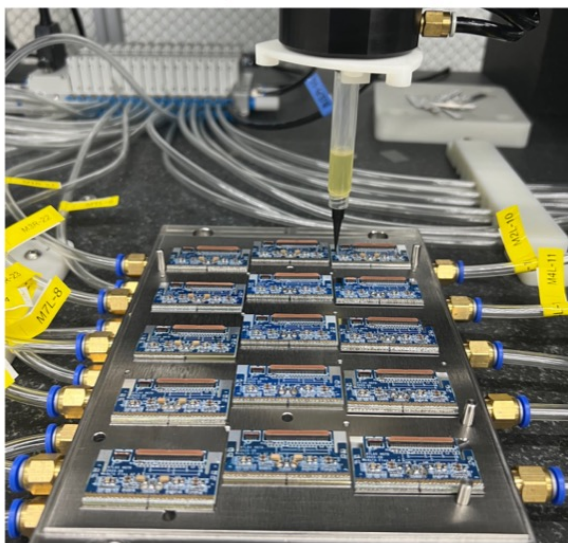
- 高能所研制项目首批两个ALTIROC3大面积探测器单元
  - 每个探测器单元有15个模块，约~500平方厘米面积。
  - 高能所樊云云担任探测器单元Level-3召集人
- 高能所与科大合作，在大面积龙门机器人上做探测器单元量产的准备

## 自动定位与点胶

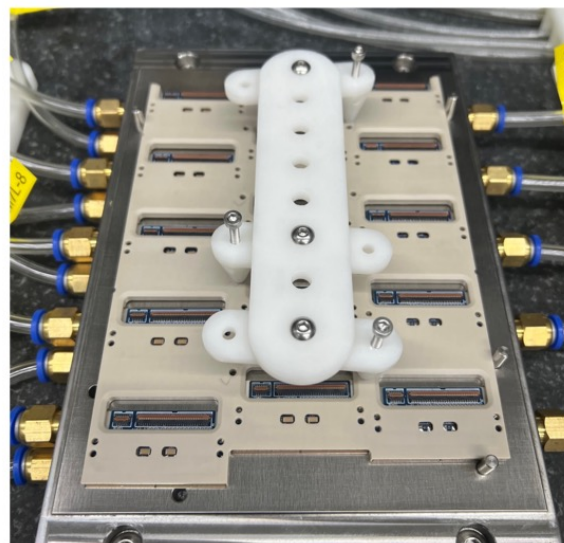
Front side



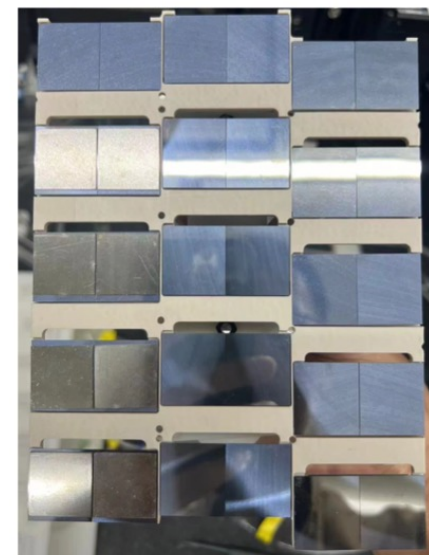
Dispensing with Gluing Tool



Put the support unit



Backside view after removal

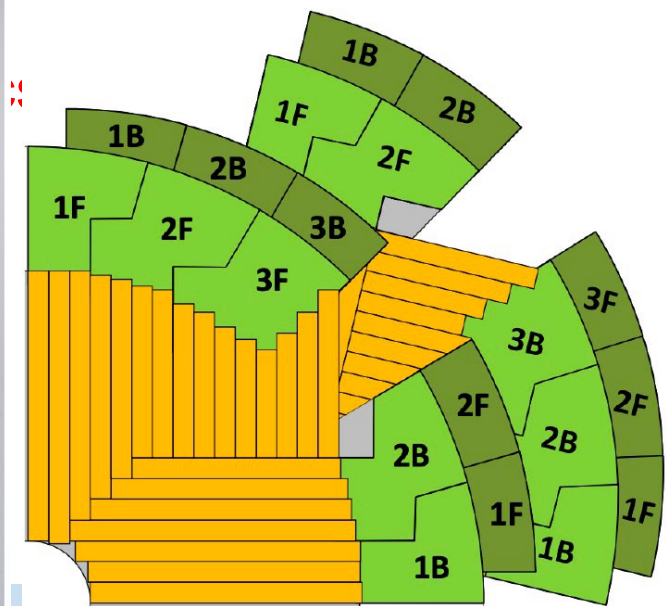




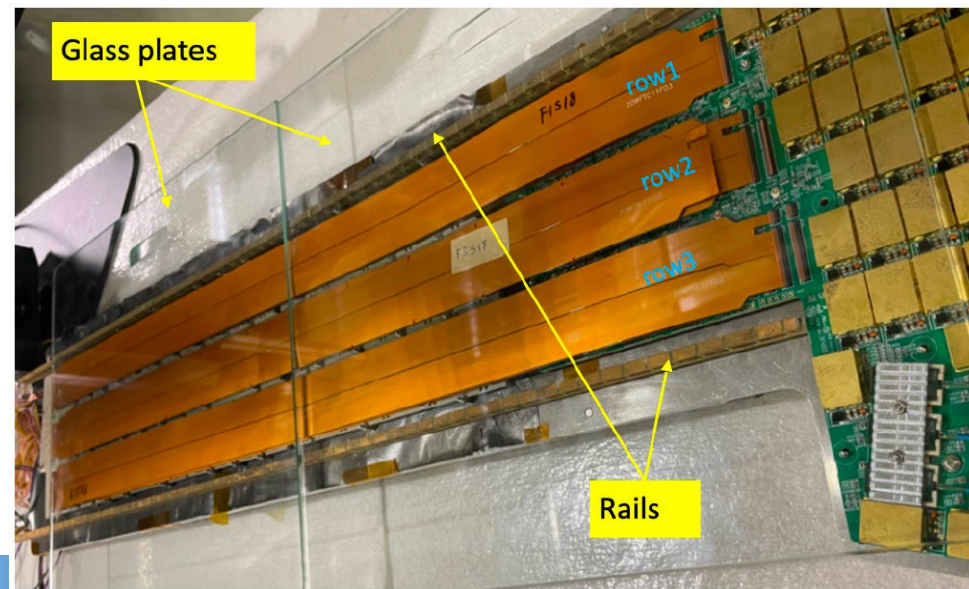
# 外围电路板与柔性电缆

- 高能所与南大合作设计出HGTD项目首个外围电路板
  - CERN P2UG 评委认可这个板子的研发难度非常大
  - 同时与55个模块通讯，二十多层金属层，52个电源，12个IpGBT模块
  - 高能所张杰担任电子学Level-2召集人
- 山大研发柔性电缆，解决阻抗匹配、高速传输等问题，满足实验上厚度要求

外围电路板



外围电路板与柔性电缆



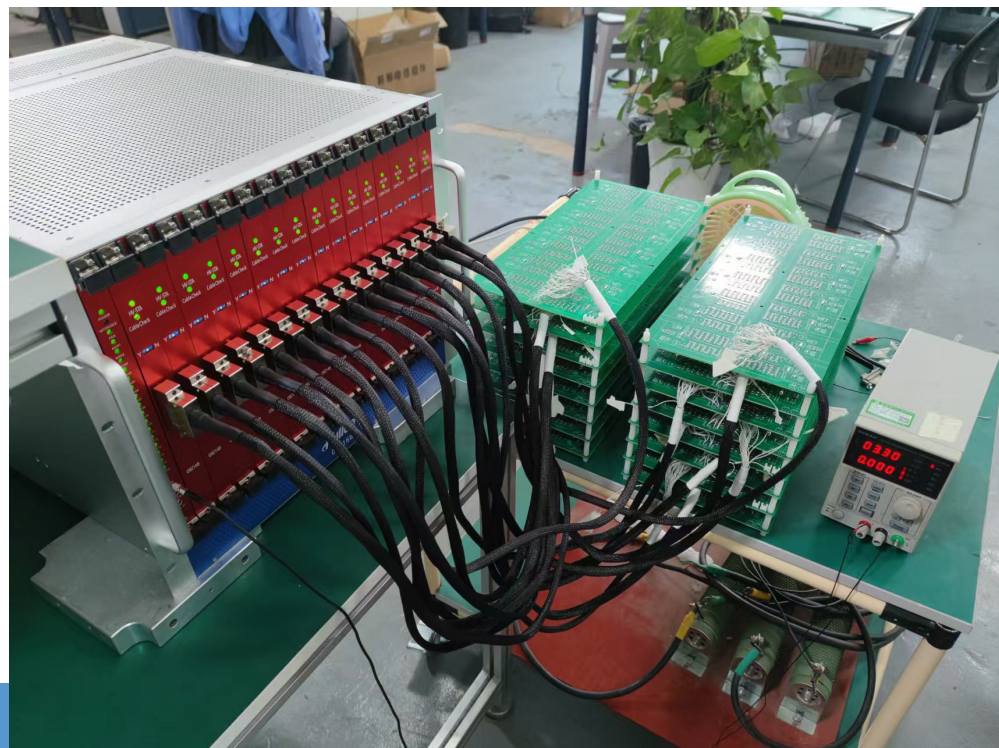
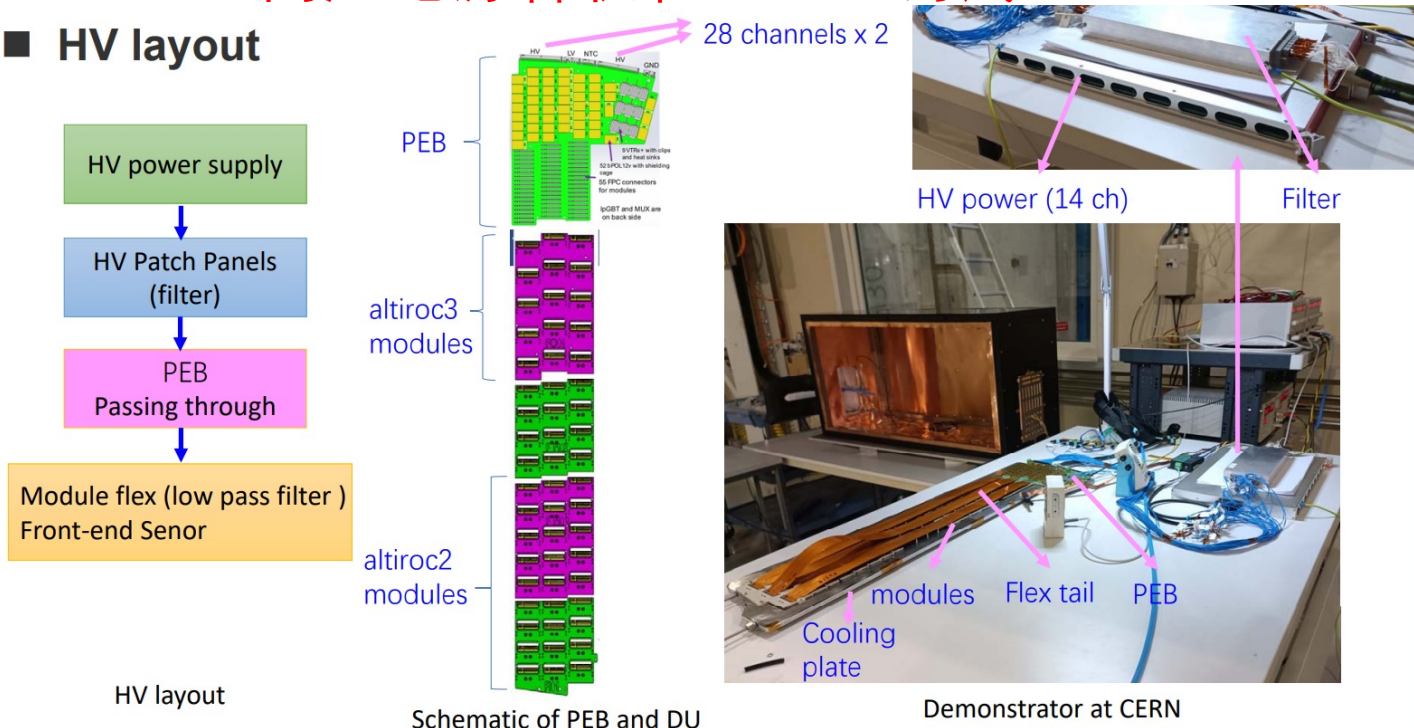
# 高压电源

- 高能所、山大承担18%的高压电源研制任务
  - 与国内福德公司研发出高压系统样机，实现高精度100nA的漏电流测量
  - 通过CERN的评审，开始预量产
  - 山大承担了在CERN的量产电源测试任务

高压电源样机预量产

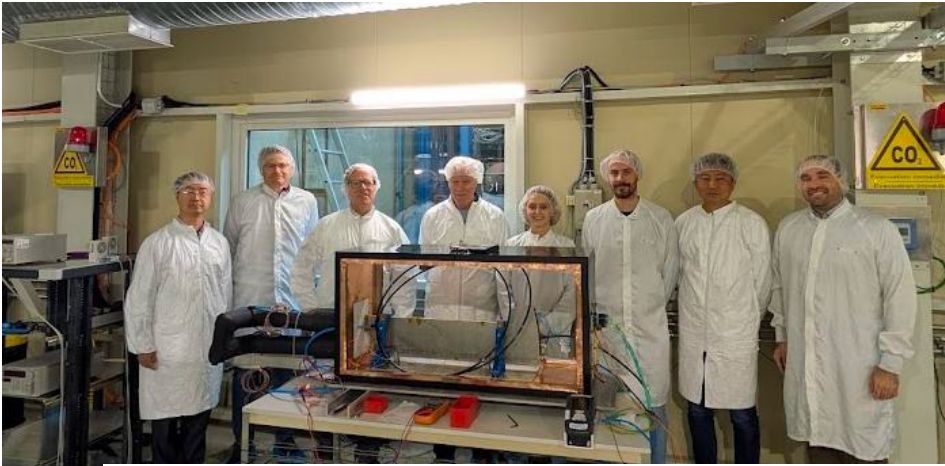
高压电源样机在CERN测试

## ■ HV layout

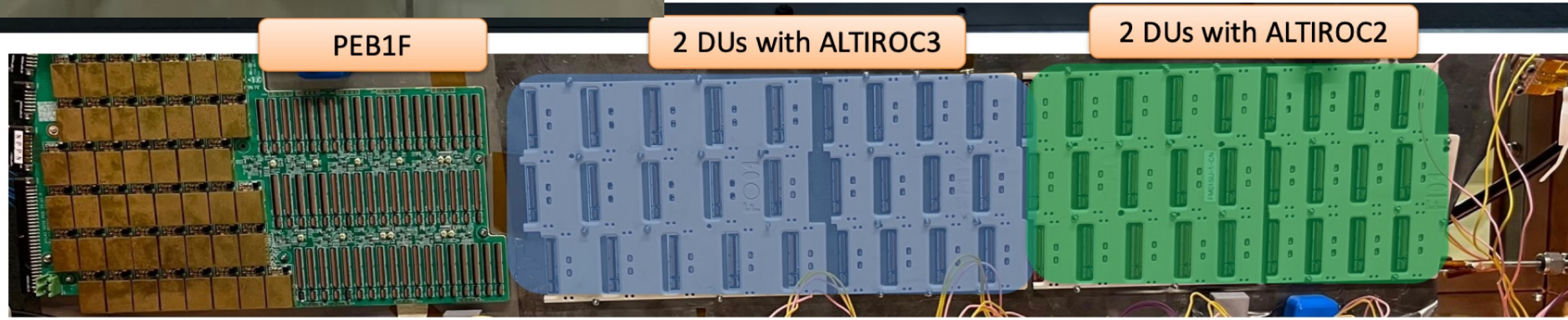
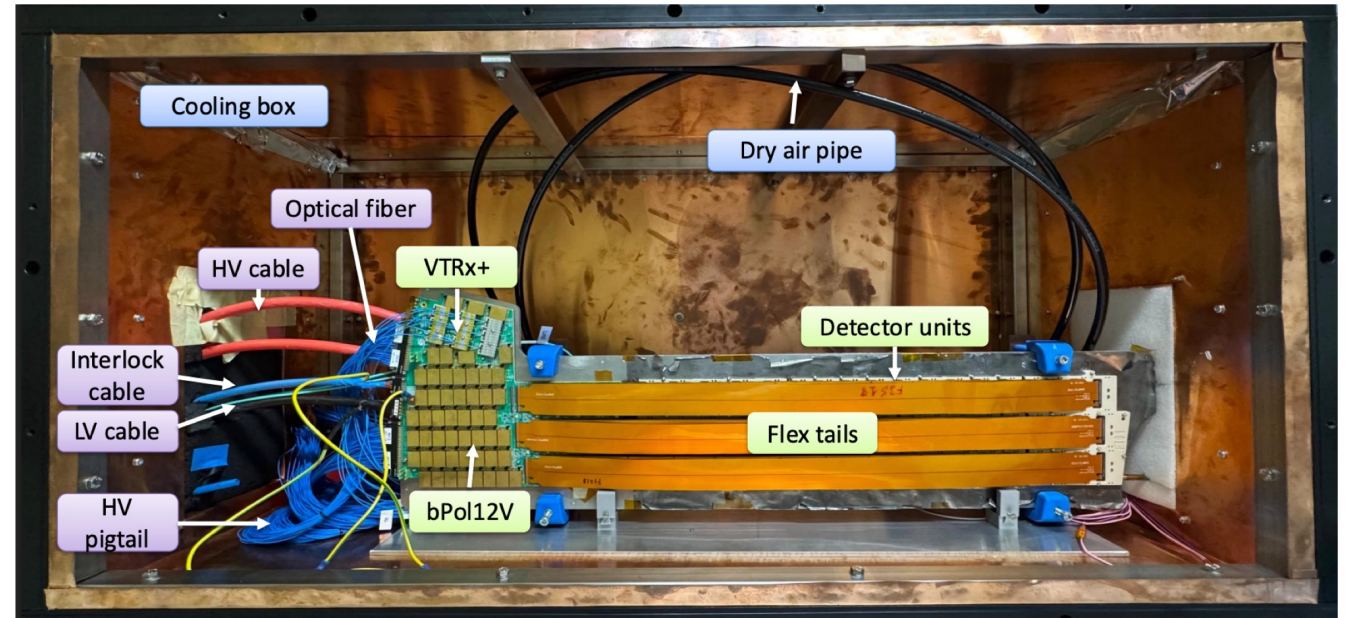


# HGTD探测器大型样机

- 中国组在研制54模块的大型样机研发起主要作用
  - 首次验证数十个模块，上万个通道的高时间分辨探测器系统



2025 ATLAS探测器升级的评审会  
项目组与评委合照

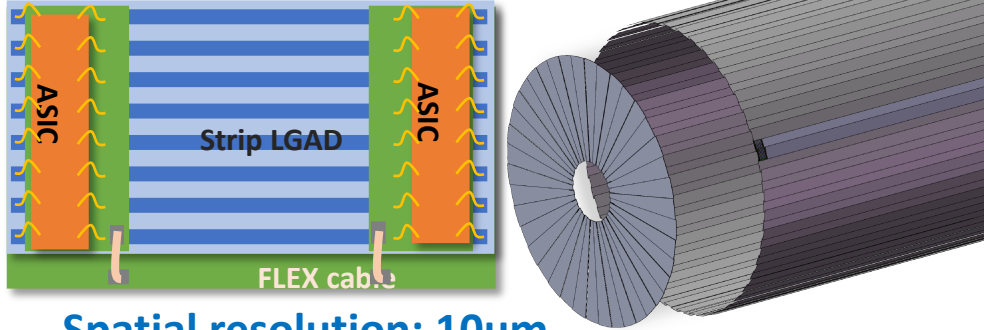


# 小结: ATLAS实验高颗粒度时间探测器

- 中国组在该项目中占**主导地位**，担任等**项目经理**等多个领导职务。
- LGAD传感器，共需要2.1万个传感器，目前已经研制约2000个：
  - **高能所-微电子所赢得欧洲核子中心（CERN）国际招标**
  - 高能所将提供**90%**的LGAD，科大将提供**10%**的LGAD
- ASIC：高能所、上交、山大将承担**50%**晶圆测试
- 探测器模块与探测器单元：
  - 高能所、科大、山大、上交将组装~4000个模块，**占项目45%**
- 外围电路与电源：高能所、南大研制了首个外围电路板样机
- 高压电源：高能所、山大承担**18%**的高压电源，已经研制出样机
- 柔性电路板：山大承担**34%**的柔性电缆的研制任务

# 基于LGAD的高时间分辨的探测器技术

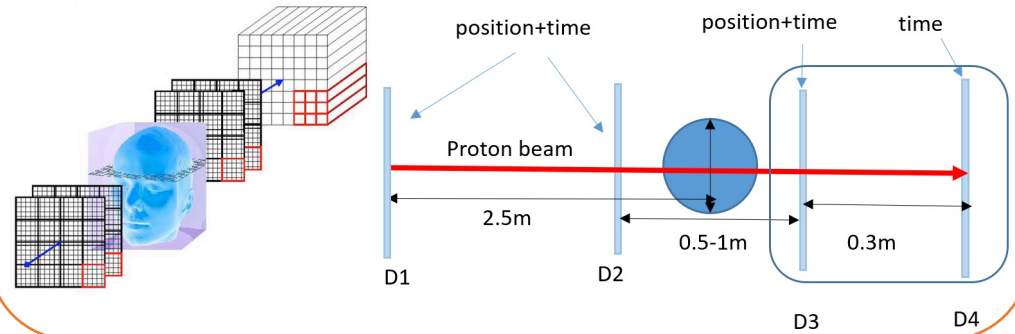
## CEPC : Outer Tracker+ TOF



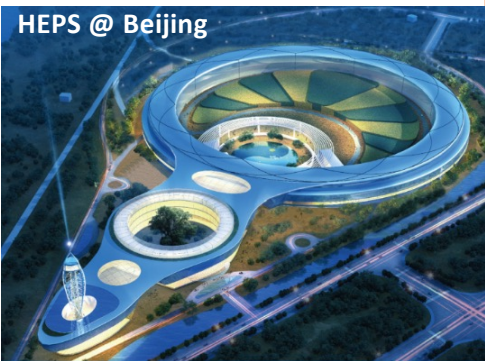
**Spatial resolution: 10um**  
**Timing resolution: 30- 50ps**

>70m<sup>2</sup> area

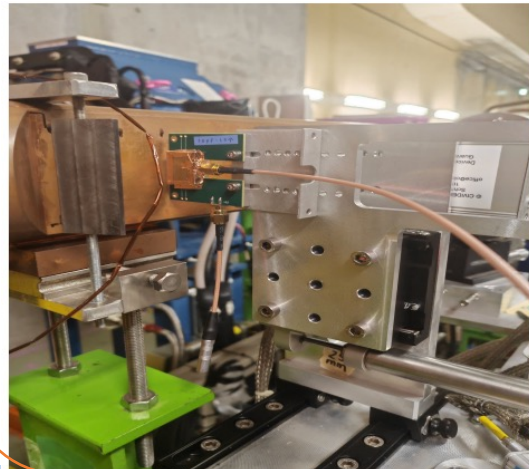
## Nuclear Medicine Instruments : Such as proton therapy and proton CT



## X-ray detectors



## LGAD beam monitor @ BELLE2

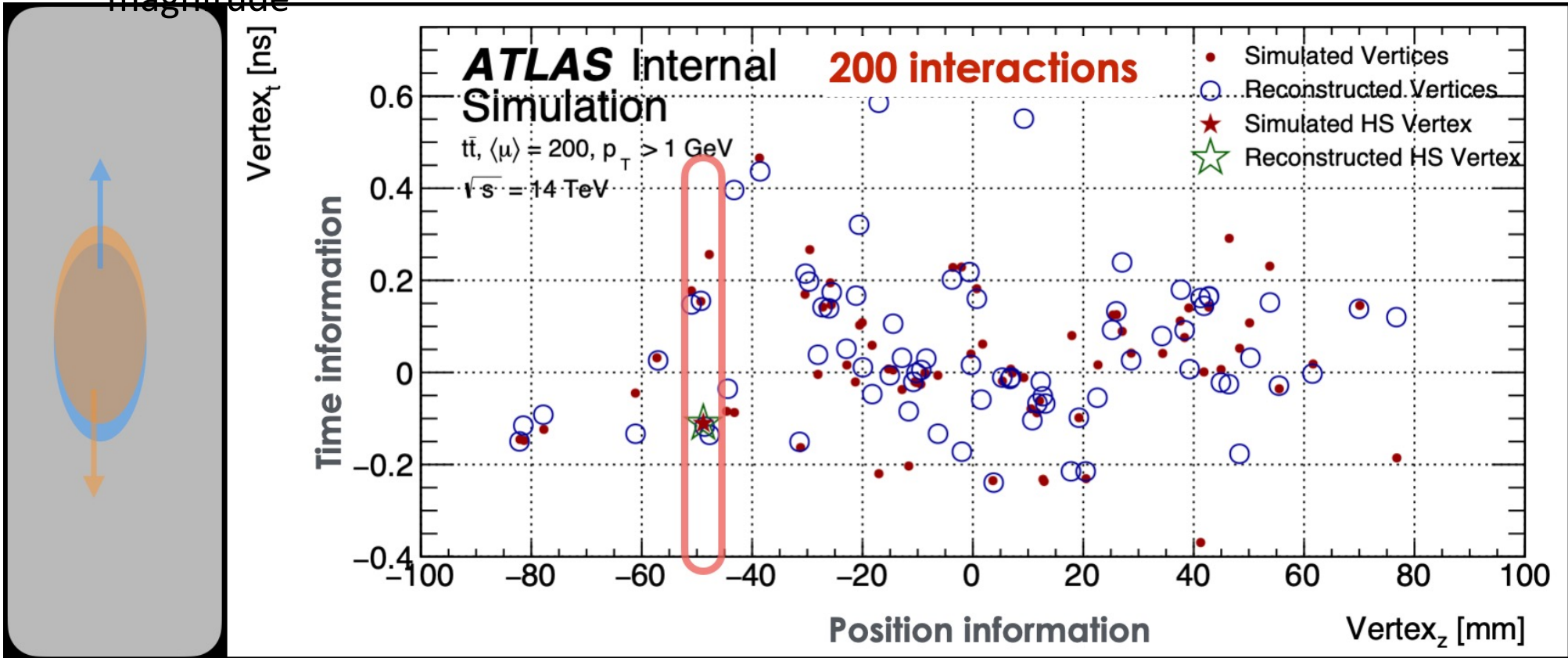


## other applications

- Beam Telescope for Beam Test Platform
- LiDAR: Positioning and Navigation
- Track and time detectors in other particle physics and nuclear physics experiments
- ...

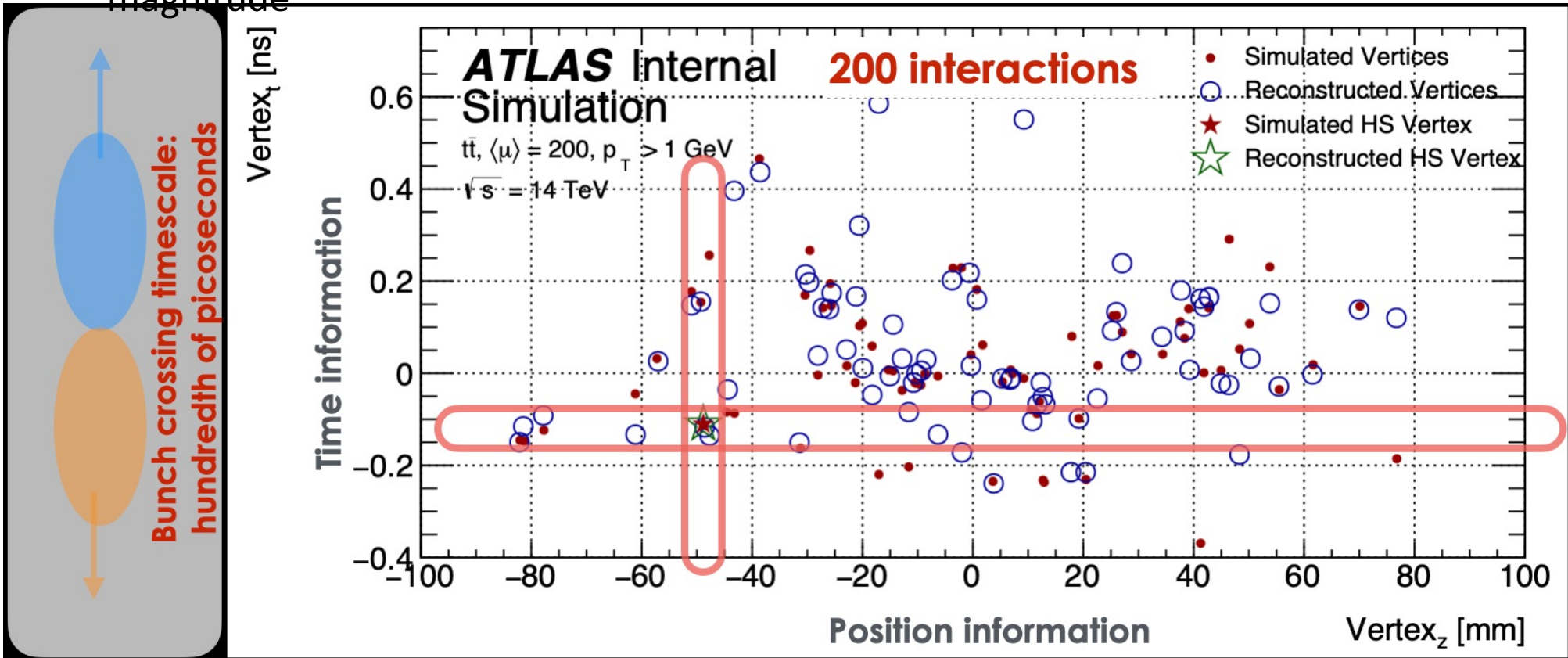
# Motivation

- Pileup background is major challenges at high luminosity LHC
- High precision timing info can reduce the pileup by one order of magnitude



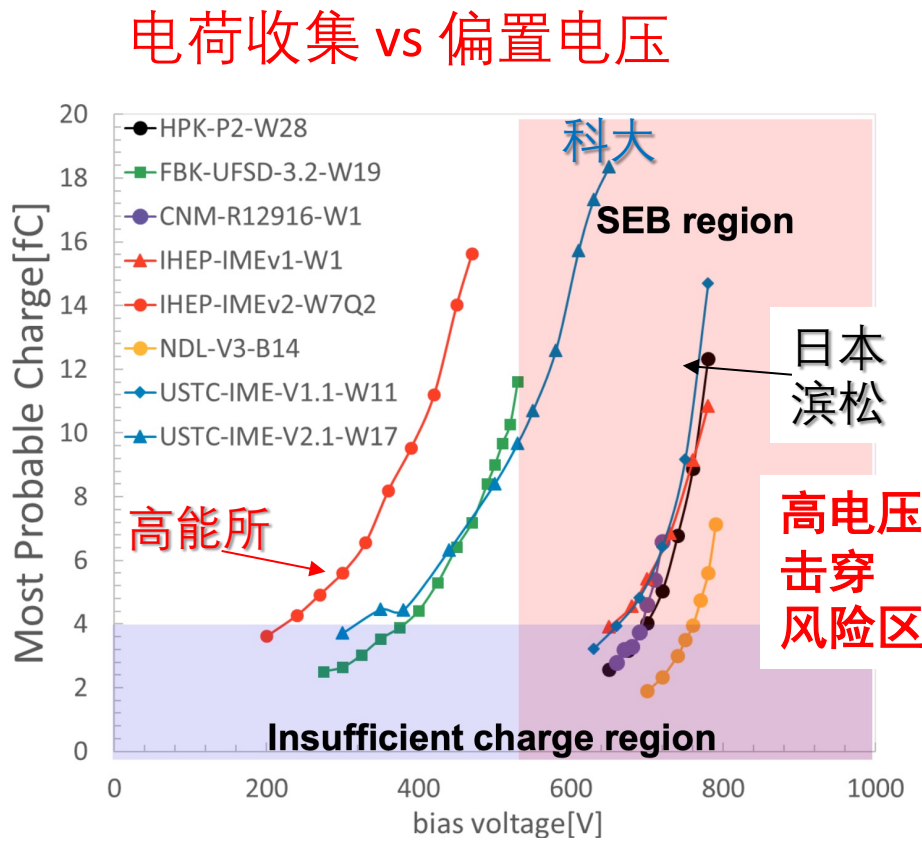
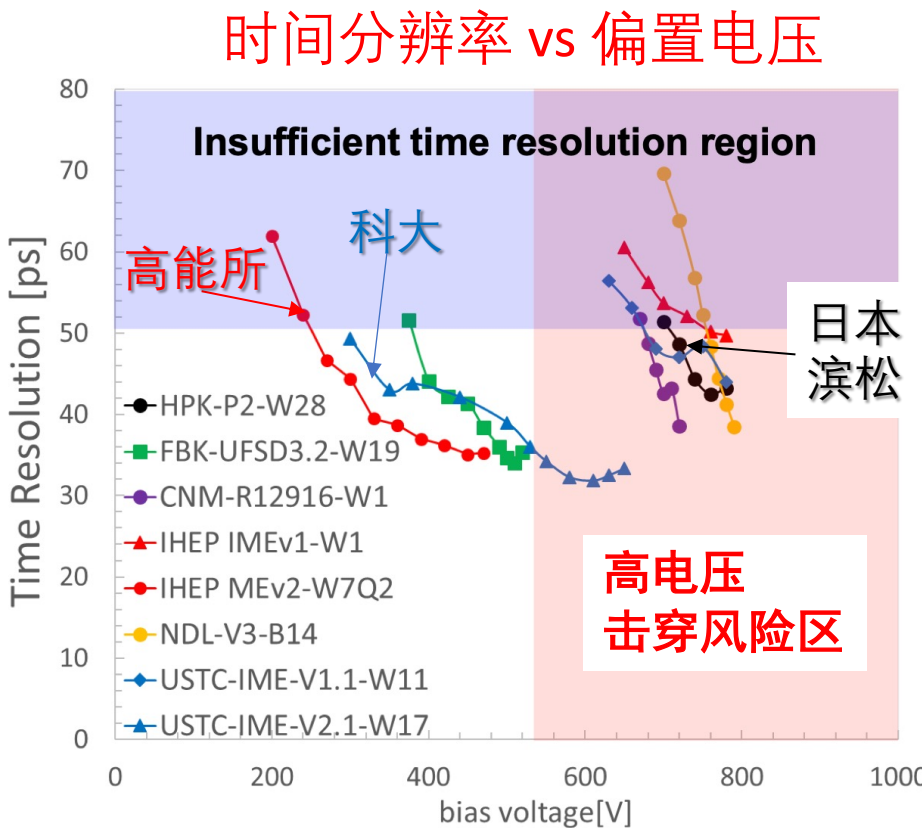
# Motivation

- Pileup background is major challenges at high luminosity LHC
- High precision timing info can reduce the pileup by one order of magnitude



# LGAD传感器在辐照后的性能 ( $2.5e15 \text{ cm}^{-2}$ )

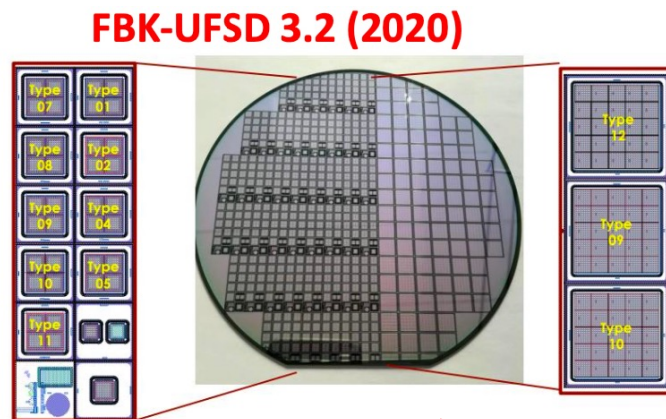
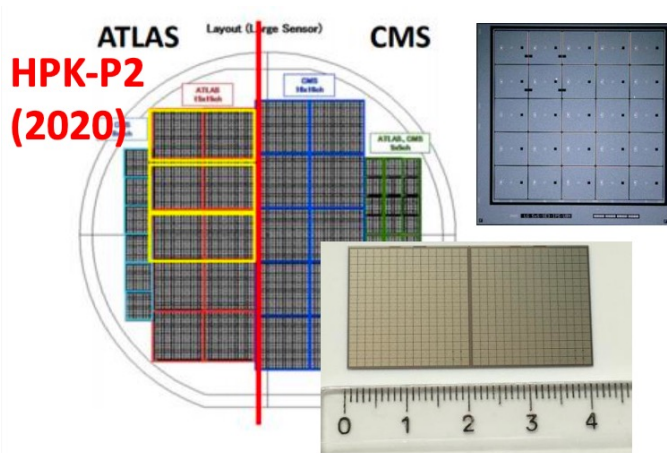
- 掺碳的LGADs 满足ATLAS实验的 HGTD 要求 (高能所, 科大, 意大利FBK)
  - 30-50皮秒的时间分辨率
  - 4fC以上的电荷收集, 工作电压低于550V (避免烧毁)



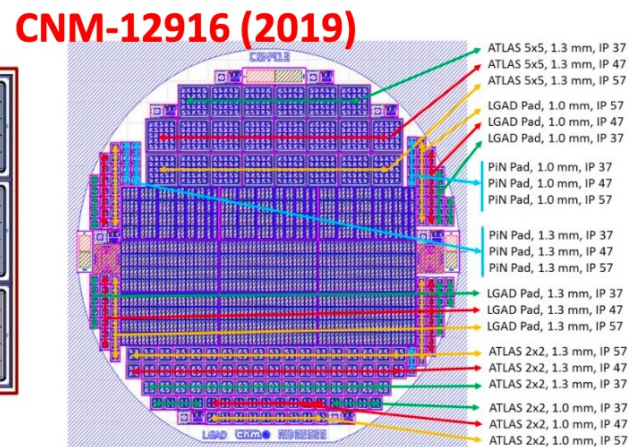


# LGAD低增益雪崩硅传感器：国内外形势

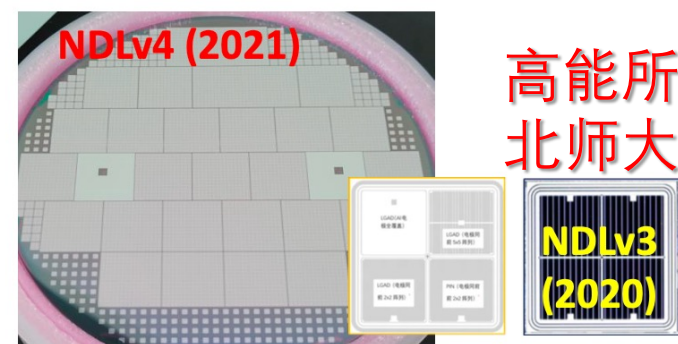
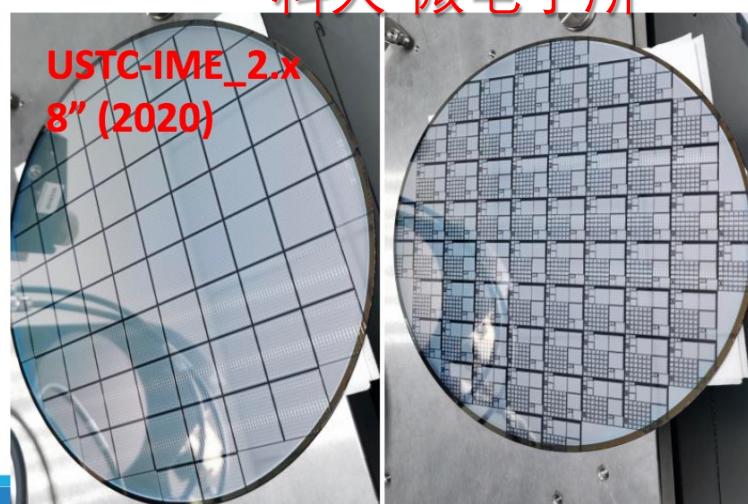
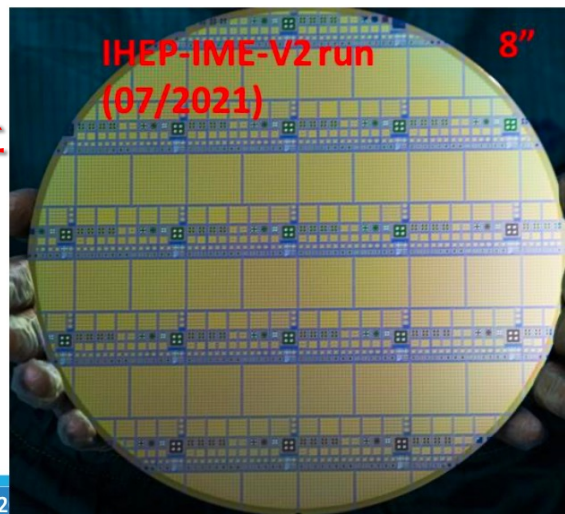
- 2015年后，全世界范围涌现出很多研制LGAD硅传感器的单位
  - 国内：IHEP-IME (高能所-微电子所), USTC-IME (科大-微电子所), NDL(高能所-北师大)
  - 国际：滨松HPK (Japan), FBK (意大利), CNM (西班牙) ...



科大-微电子所



高能所-微电子所



高能所北师大

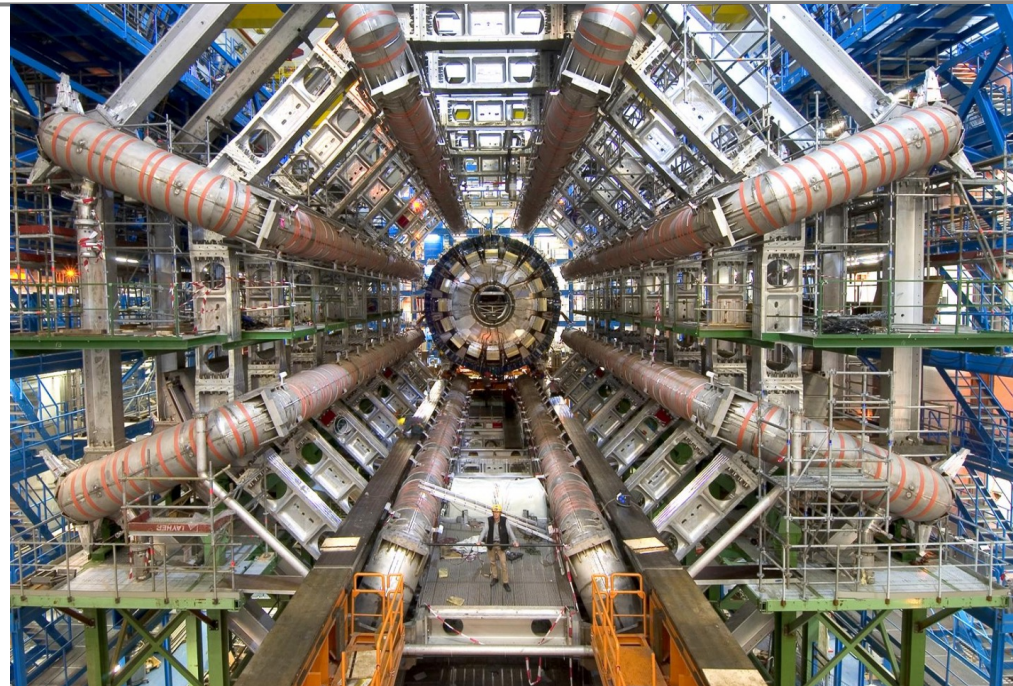
PLANAR TECHNOLOGY – more vendors (e2V, BNL, Micron ...)

# 大型强子对撞机与ATLAS实验



## 大型强子对撞机

- 周长**27km**，总投资**40亿美元**
- 世界能量**最高**的加速器
- 质心系能**14TeV** ( $14 \times 10^{12} \text{eV}$ )
- 位于瑞士与法国边境



## ATLAS探测器

- 大约**3000人**的一个实验组
- **6层楼高** (**25米**) 的大型探测器
- 探测对撞产生粒子能量与动量